

基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉 模糊 PID 温度控制

张 越

(湖北科技学院 计算机科学与技术学院, 湖北 咸宁 437000)

摘要:工业锅炉在能源转换方面具有非线性、时变性及热惯性大等特性,且易受燃料质量、环境风速等多种外部因素干扰,导致温度控制精度难以保证。因此为提高设备运行效率,现提出基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊 PID 温度控制。通过将锅炉输入能量分解为有效利用能量以及热量损失,并考虑排烟损失以及散热损失等因素,对热平衡方程进行构建。基于锅炉的热平衡方程和动态特性,建立主蒸汽温度与控制变量之间的数学模型,描述温度与燃料供应量、减温水流量以及锅炉负荷之间的关系。通过高精度热电偶传感器实时采集锅炉主蒸汽温度数据,并结合模糊控制器,计算燃料供应量与减温水流量调整值,实现对锅炉温度的精确控制。在实验中,对提出的方法进行了控制精度的检验。最终的测试结果表明,采用提出的方法对锅炉进行温度控制时,系统振荡次数较少,具备较为理想的控制效果。

关键词:热电偶温度传感器;工业锅炉;模糊 PID;温度控制;控制精度

中图分类号:TP273

文章编号:1000-0682(2025)01-0111-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.020

Fuzzy PID temperature control of industrial boiler based on thermocouple temperature sensor data acquisition

ZHANG Yue

(University of Computer Science and Technology, Hubei University of Science and Technology, Hubei Xianning 437000, China)

Abstract: Industrial boiler in the energy conversion with nonlinear, time-varying and thermal inertia characteristics, and susceptible to fuel quality, ambient wind speed and other external factors interference, resulting in temperature control accuracy is difficult to ensure. Therefore, in order to improve the operating efficiency of the equipment, the fuzzy PID temperature control of industrial boiler based on the data acquisition of thermocouple temperature sensor is proposed. The heat balance equation is constructed by decomposing the input energy of the boiler into effectively utilized energy and heat loss, and considering factors such as smoke loss and heat loss. Based on the heat balance equation and the dynamic characteristics of the boiler, a mathematical model between the main steam temperature and the control variables is established to describe the relationship between the temperature and the fuel supply, the desuperheating water flow and the boiler load. The main steam temperature data of the boiler is collected in real time by a high-precision thermocouple sensor, and combined with a fuzzy controller, the adjusted values of fuel supply and desuperheating water flow are calculated to realize the precise control of the boiler temperature. In the experiments, the control accuracy of the proposed method is examined. The final test results show that when the proposed method is used to control the temperature of the boiler, the number of system oscillations is less, and it has a more ideal control effect.

Keywords: thermocouple temperature sensor; industrial boiler; fuzzy PID; temperature control; control accuracy

0 引言

在工业领域,尤其是锅炉控制方面,温度的稳定性和精确性对生产安全、生产效率、产品质量以及节能等方面具有至关重要的作用。工业锅炉作为能量转换和传递的重要设备,其温度控制系统的性能直接影响到整个生产线的运行效率和产品质量^[1]。因此,研究并实现基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊 PID 温度控制系统,对于提升工业生产的自动化水平和经济效益具有重要意义。

目前,随着自动控制算法与智能算法的不断发展,锅炉温度控制技术取得了显著进展。例如,文献[2]通过模糊逻辑系统对锅炉运行数据进行初步分类和模糊化处理,随后利用神经网络进行精确拟合与控制。尽管该方案在理论上能够提供较高的灵活性,但在实际运行中,由于模糊规则库的局限性以及神经网络训练数据的不足,导致系统在面对复杂工况时控制精度有所下降。文献[3]通过采用历史数据对网络模型进行训练,从而对锅炉未来温度趋向变化情况进行预测,并据此调整控制参数。但由于锅炉系统的非线性特性和外部干扰因素的不确定性,神经网络模型的预测精度往往受到限制,从而导致控制决策的偏差,影响了最终的控制精度和稳定性。文献[4]探索了 Smith 预估控制与遗传算法相结合的方法,以优化燃油蒸汽锅炉的燃烧控制过程。Smith 预估控制用于补偿系统滞后,提高响应速度,而遗传算法则用于优化控制参数,以达到最佳的控制效果。但在实际运行过程中,由于 Smith 预估模型与实际系统之间的匹配度难以达到完美,以及遗传算法在复杂优化问题中的局限性,导致控制精度仍存在一定的波动。文献[5]提出了一种结合滚动时域优化与主动抗扰控制的混合控制策略,用于锅炉过热蒸汽温度的控制。但滚动时域优化算法的计算复杂度较高,且在实际系统中,主动抗扰控制器的设计参数往往难以精确确定。

本研究设计了基于热电偶温度传感器数据采集的模糊 PID 温度控制算法。通过模糊逻辑优化 PID 控制参数,并利用热电偶传感器的高精度与实时性,实现对锅炉温度的精确、快速且稳定地控制。

1 工业锅炉模糊 PID 温度控制方法

1.1 工业锅炉热平衡方程构建

由于工业锅炉内部涉及多种热传递过程,如辐射、对流和传导等,因此为了理解锅炉内部热传递机

制,首先针对锅炉热平衡方程进行构建。

在构建工业锅炉的热平衡方程时,需要描述锅炉在运行过程中,输入能量 Q_{in} 、有效利用能量 Q_{out} 以及能量损失 Q_{loss} 之间的关系。这些能量包括燃料燃烧释放的化学能、锅炉产生的蒸汽或热水的热能,以及通过各种途径散失的能量^[6]。首先需要对锅炉的输入能量 Q_{in} 进行确定,假设燃料的低位发热量为 Q_{fuel} ,燃料消耗量为 m_{fuel} ,则锅炉输入能量表达式如下所示:

$$Q_{in} = \frac{m_{fuel}}{Q_{fuel}} \quad (1)$$

锅炉的有效利用能量是指锅炉产生的蒸汽或热水所携带的热能^[7]。假设锅炉产生的蒸汽质量为 m_{steam} ,其焓值为 h_{steam} ,则锅炉的有效利用能量 Q_{out} 表达式如下所示:

$$Q_{out} = \frac{m_{steam}}{h_{steam}} \quad (2)$$

考虑到锅炉在运行过程中,会有部分能量通过各种途径散失,如排烟热损失 Q_1 、散热损失等 Q_2 ^[8]。这些损失的总和可表示为 Q_{loss} ,则可以结合能量守恒原理,对热平衡方程进行构建,具体方程表达式如下所示:

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_{loss} &= Q_1 + Q_2 \\ &= V_{py} \cdot (C_{py} \cdot t_{py} - C_{air} \cdot t_0) + K \cdot A \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

其中: V_{py} 代表排烟量; C_{py} 代表排烟比平均比热容; t_{py} 代表排烟温度; C_{air} 代表冷空气的平均比热容; t_0 代表环境温度; K 代表散热系数; A 代表散热面积; Δt 代表锅炉表面温度与环境温度之差。

1.2 主蒸汽温度与控制变量关系建模

基于锅炉的热平衡方程和动态特性,建立主蒸汽温度与控制变量之间的数学模型^[9]。该模型能够反映锅炉在不同工况下的动态响应特性,包括温度变化的速率、超调量、稳态误差等,为后续的温度控制提供帮助。

主蒸汽温度受到多种因素的影响,包括燃料供应量、减温水流量、锅炉负荷、给水温度等^[10]。为了建立主蒸汽温度与控制变量之间的数学模型,需要考虑这些因素对主蒸汽温度的动态影响。首先燃料供应量的增加会提高锅炉的输入热量,从而增加主蒸汽的焓值,提高主蒸汽温度^[11]。由此可以构建出燃料供应量与主蒸汽温度之间的关系表达式如下所示:

$$T_{\text{steam}} dt = \frac{K_1 \cdot \Delta Q_{\text{fuel}}}{m_{\text{steam}} \cdot C_p} \quad (5)$$

其中: T_{steam} 代表主蒸汽温度; ΔQ_{fuel} 代表燃料供应量变化引起的热量变化; C_p 代表主蒸汽的比热容; K_1 代表比例系数。减温水流量的增加会降低主蒸汽的温度, 因为减温水会吸收主蒸汽中的热量^[12]。具体关系表达式如下所示:

$$T_{\text{steam}} = \frac{K_2 \cdot m_{\text{des}} \cdot C_p^{\text{water}} \cdot (T_{\text{steam}} - T_{\text{water}})}{m_{\text{steam}} \cdot C_p} \quad (6)$$

其中: m_{des} 代表减温水的质量流量; C_p^{water} 代表水的比热容; T_{water} 代表减温水的温度; K_2 代表另一个比例系数。锅炉负荷的变化会影响主蒸汽的质量流量和温度。负荷增加时, 主蒸汽质量流量增加, 但温度可能由于热量分配不均而降低^[13]。假设 $Q_{\text{out}}^{\text{load}}$ 代表负荷变化引起的输出热量变化, 则锅炉负荷与主蒸汽温度之间的关系表达式如下所示:

$$T_{\text{steam}} = \frac{K_3 \cdot (Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}^{\text{load}})}{m_{\text{steam}}^{\text{load}} \cdot C_p} - \frac{K_4 \cdot \Delta L_{\text{load}}}{m_{\text{steam}}^{\text{load}} \cdot C_p} \quad (7)$$

其中: ΔL_{load} 代表负荷变化量; $m_{\text{steam}}^{\text{load}}$ 代表负荷变化后的主蒸汽质量流量; K_3 和 K_4 代表两个分式对应的比例系数。通过将上述关系表达式进行整合与联立, 即可得到锅炉主蒸汽温度与燃料供应量、减温水流量以及锅炉负荷之间的关系, 从而实现工业锅炉动态特性建模。

1.3 热电偶温度传感器下工业锅炉模糊 PID 温度控制

通过高精度热电偶传感器实时采集锅炉主蒸汽温度数据, 并结合模糊控制器, 计算燃料供应量与减温水流量调整值, 实现对锅炉温度的精确控制。

根据锅炉主蒸汽的工作温度范围, 选择具有相应测温范围和精度的热电偶传感器。对此, 该文选用 K 型热电偶传感器作为数据采集设备。将热电偶传感器插入锅炉主蒸汽管道中, 确保传感器的工作端(热端)能够充分接触蒸汽, 以获取准确的温度信息。固定热电偶传感器, 防止其在蒸汽流动或锅炉振动时发生位移或损坏。然后启动设备开始进行温度数据采集, 由于热电偶传感器产生的热电势通常很小(毫伏级), 因此需要对传感器信号进行放大。由此可以得到差分放大器电路的输出电压 V_o 表达式如下所示:

$$V_o = A \cdot (V_{\text{in}+} - V_{\text{in}-}) \quad (8)$$

其中: A 代表运算放大器的开环增益; $V_{\text{in}+}$ 和 $V_{\text{in}-}$ 分别代表差分放大器的正输入端以及负输入端。由于热电偶的输出是一个差分信号, 因此可以

将其表示为 $V_{\text{ther}} = V_{\text{hot}} - V_{\text{cold}}$, 其中 V_{hot} 代表热电偶热端的电压, V_{cold} 代表热电偶冷端的电压。将 $V_{\text{in}+}$ 和 $V_{\text{in}-}$ 分别与 V_{hot} 和 V_{cold} 相连, 以此可以将热电偶的热端和冷端的电压差作为差分放大器的输入信号。差分放大器就能够准确地放大这个电压差, 并将其转换为相应的温度值^[14]。

针对采集到的热电偶传感器的温度数据进行去噪处理, 假设 $x(n)$ 代表预处理后的温度监测信号, 则去噪后的信号 $y(n)$ 表达式如下所示:

$$y(n) = [M \cdot b_k x(n-k)] - [N \cdot a_k y(n-k)] \quad (9)$$

其中: b_k 和 a_k 分别代表滤波器系数; k 表示滤波器的数量, M 和 N 分别为分子和分母多项式的阶数。由此该文构建出的模糊控制器结构如图 1 所示。

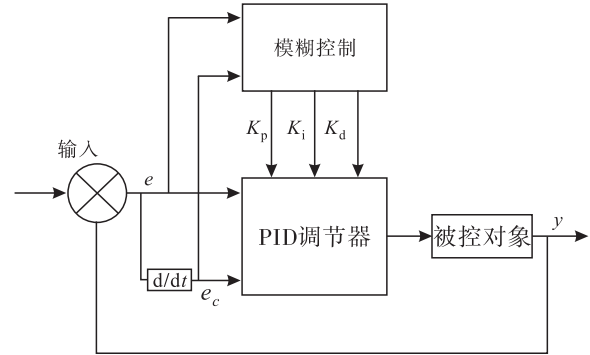


图 1 模糊控制器拓扑结构

通过分析主蒸汽温度与燃料供给量、减温水流量等调控因素间的数学关系, 设定模糊控制器的输入参数为主蒸汽温度偏差及其变化速率, 而其输出参数则调整为控制指令的修正值, 具体包括燃料供给量的调整量和减温水流量的调整量^[15]。然后制定模糊规则: 当主蒸汽温度偏差较大时, 应增加燃料供应量以快速升温; 当偏差变化率较大时, 应调整减温水流量以稳定温度。结合数学模型中的关系式, 计算实际的控制量。对于燃料供应量, 其具体计算公式如下所示:

$$Q_{\text{fuel}}(t) = Q_{\text{fuel}}(t-1) + \Delta Q_{\text{fuel}}(t) \quad (10)$$

其中: $Q_{\text{fuel}}(t-1)$ 代表上一时刻的燃料供应量; $\Delta Q_{\text{fuel}}(t)$ 代表当前时刻模糊 PID 控制器输出的燃料供应量调整值。减温水流量的计算同样可以参考上述公式。最后将计算得到的实际控制量发送给锅炉的燃料供应系统和减温水系统执行机构, 以调整燃料供应量和减温水流量, 从而实现对主蒸汽温度的模糊控制。将本节内容与上述提到的热平衡方程与动态建模等相关内容进行结合, 至此, 基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊 PID 温度控制方法设计完成。

2 实验论证

2.1 实验准备

为验证该文提出的锅炉模糊 PID 温度控制方法的实际性能,以某火电厂锅炉 300 MW 机组作为控制对象,通过对不同运行工况进行模拟,采用该文算法对其进行仿真温度控制,并与神经网络和遗传算法下的控制效果进行对比。

实验所选取的火电厂锅炉 300 MW 机组的锅炉的主体部分由垂直布置的膜式水冷壁构成,锅炉的尾部烟道布置有多级受热面,包括过热器、再热器、省煤器和空气预热器。此外,该锅炉还配备了先进的脱硫、脱硝及除尘装置,以符合国家严格的环保排放标准。机组的具体性能参数如表 1 所示。

表 1 300 MW 火电机组性能参数

参数类型	参数名称	数值
锅炉本体参数	炉膛尺寸(长×宽×高)	20 m×15 m×40 m
	水冷壁面积	3500 平方米
	过热器受热面积	1200 平方米
	省煤器受热面积	900 平方米
	空气预热器受热面积	4000 平方米
燃烧系统参数	制粉系统出力(每台)	50 吨/小时
	制粉系统数量	6 台
	送风量(设计工况)	1 200 000 m ³ /h
汽水系统参数	额定蒸发量	1025 吨/小时
	过热蒸汽压力	17.45 MPa
	过热蒸汽温度	541 ℃
	再热蒸汽压力	3.45 MPa
	再热蒸汽温度	541 ℃
	给水温度(设计工况)	220 ℃

采用 XT-1500 型高精度热电偶温度传感器对锅炉关键部分的温度进行监测,为模糊 PID 温度控制系统提供可靠的数据输入。传感器的温度测量范围根据具体监测位置的温度范围选择,过热器出口温度范围为 500 ℃~560 ℃,热电偶精度为±0.75%,传感器输出为 4~20 mA 电流信号,便于与 DCS 系统连接。在过热器出口、炉膛出口、水冷壁以及省煤器出入口均安装温度传感器,具体监测位置 1~8 如图 2 所示。



图 2 温度监测点位分布情况

传感器安装数量根据锅炉结构和监测需求确定,假设在每个监测位置安装 2 个热电偶传感器,以实现冗余备份。

为了确保锅炉模糊 PID 温度控制方法的验证过程具有全面性和深度,实验需要对具体工况模拟情况进行设计,确保每次模拟都能覆盖到不同的运行条件和扰动情况。对此,模拟除了三种不同的工况,分别为负荷变化与煤质稳定工况,煤种变化与负荷稳定工况以及多因素综合扰动工况。参数如表 2 所示。

表 2 工况参数配置

编号	参数名称	初始值/ 基准值	工况一	工况二	工况三
1	机组负荷/MW	300	270~330	300	250~350
2	煤种(热值 kJ/kg)	20 000	20 000	18 000	22 000
3	给水温度/℃	220	218~222	220	215~225
4	炉膛压力设定值/Pa	-50	-50	-50	-40~-60
4	锅炉效率目标值/%	92	91.5~92.5	91~92	90~93

通过分别采用三种方法对上述三种工况下的锅炉温度进行模拟控制,并与预设的目标温度进行对比分析,从而分析方法在控制精度方面的差异性。同时,实验对比了模糊 PID 控制器以及常规 PID 控制器的阶跃响应情况。设定模拟时间为 90 s,记录两种控制器在输出响应值波动情况。

2.2 控制器阶跃响应情况

实验设定一个阶跃输入信号,将过热蒸汽温度设定值从 540 ℃突然改变至 550 ℃,并分别用 PID 算法以及模糊 PID 算法对其进行温度控制,使其稳定到 540 ℃,两种算法下的阶跃响应情况如图 3 所示。

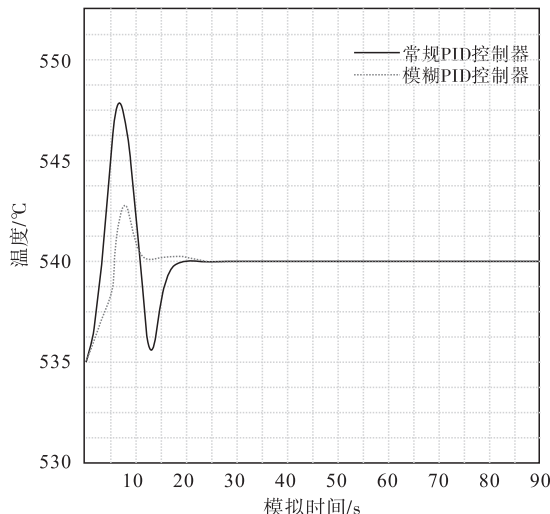


图 3 控制器阶跃响应情况

通过上图可以明显看出,由于模糊 PID 算法采用了模糊逻辑和自适应调整参数的策略,它能够更灵活地应对温度的变化。在温度超过 550 ℃ 后,模糊 PID 算法能够更快地识别出超调趋势,并采取相应的反向调整措施,从而显著减少了超调和振荡的幅度。两种控制器的超调量以及调节时间如表 3 所示。

表 3 超调量及超调时间对比

控制器类型	超调量/%	调节时间/s
PID 控制器	12.5	32
模糊 PID 控制器	5.0	20

通过上表可以看出,相较于常规的控制,模糊 PID 控制器的超调量仅为 5.0%,表明其能够更好地控制温度的变化趋势,避免过大的超调。其调节时间比 PID 控制器快了 12 s。这表明模糊 PID 控制器能够更快地识别并响应温度的变化,从而更快地达到稳定状态。

2.3 温度控制精度对比

实验以不同控制算法在不同工况下的振荡次数作为对比指标,对算法的实际控制精度进行衡量。振荡次数与幅度是指温度响应过程中,实际温度围绕设定值波动的次数,具体实验结果如图 4 ~ 6 所示。

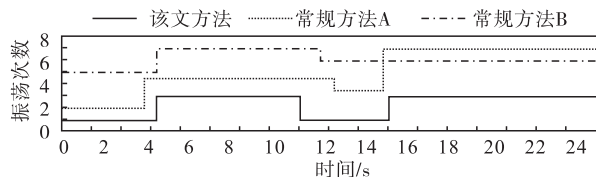


图 4 工况 1 的振荡次数对比结果

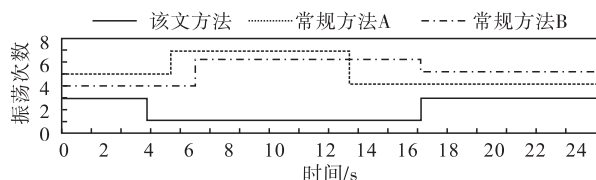


图 5 工况 2 的振荡次数对比结果

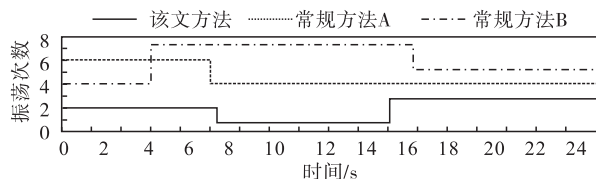


图 6 工况 3 的振荡次数对比结果

通过上述实验结果可以看出,在三种工况下对工业锅炉进行温度控制时,该文本方法均能够保持较低的振荡次数,以此可以证明在该文控制方法下,系

统更加稳定,能够减少因温度波动对设备和系统造成的损害。

3 结束语

本研究以基于热电偶温度传感器数据采集的工业锅炉模糊 PID 温度控制为核心,深入探讨了现代工业控制在锅炉温度管理中的应用与创新。通过理论分析与实验验证,不仅揭示了热电偶传感器在精确测量锅炉温度方面的潜力,还成功地将模糊 PID 控制算法引入这一传统工业领域,从而达成了锅炉温度的高精度自动调节与适应性控制目标。

参考文献:

- [1] 李泳萱,田亮,董子健. 基于 KPCA - FCM 工况精简的机组燃烧优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51 (02): 135 - 142.
- [2] 朱佳彬,陆彬盛,王伟琦,等. 基于 T - S 模糊控制神经网络的工业锅炉运行控制分析[J]. 热科学与技术, 2024, 23 (02): 189 - 197.
- [3] 杨春来,殷喆,袁晓磊,等. 基于神经网络模型的锅炉主蒸汽温度预测控制[J]. 锅炉技术, 2023, 54 (05): 30 - 36.
- [4] 毛宇涵,李来春,张亮,等. 基于 Smith 预估控制和遗传算法优化的燃油蒸汽锅炉燃烧控制[J]. 热能动力工程, 2023, 38 (03): 105 - 111.
- [5] LIU S, HUANG H, LI D, et al. A hybrid receding horizon optimization and active disturbance rejection control of boiler superheated steam temperature[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023 (178): 1107 - 1118.
- [6] 董益斌,熊敬超,王敬宇,等. 融合激光雷达料位测算的锅炉燃烧优化模型预测控制[J]. 化工学报, 2024, 75 (03): 924 - 935.
- [7] 刘伟龙,余祖珏,孙鹤铭,等. 基于动态仿真的 35 MWth 富氧燃烧锅炉岛控制策略[J]. 动力工程学报, 2023, 43 (09): 1166 - 1173.
- [8] 李柯颖,陈鲲,江泽鹏,等. 烟气再循环联合循环中燃气轮机温度控制方案[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58 (08): 1156 - 1166.
- [9] 杨玉龙,王淞,陈韬,等. 基于蓄热水箱温度可行域模糊确定的电锅炉优化调度方法[J]. 电力建设, 2023, 44 (07): 111 - 120.
- [10] 廖彭伟. 基于动态标杆值的电站锅炉燃烧控制优化[J]. 热能动力工程, 2023, 38 (05): 111 - 116.
- [11] 陈鸿鑫,马天霆,周阳,等. 基于 CNN - GAN 数据增强网络的电厂锅炉管道温度压力及健康状态预测[J]. 电子器件, 2023, 46 (06): 1593 - 1600.

(下转第 119 页)

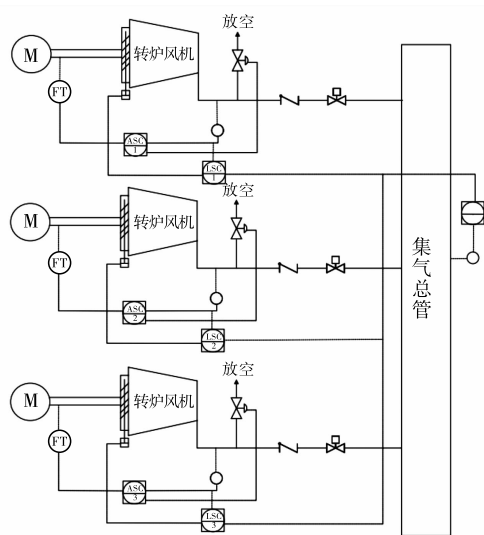


图5 多机并联与负荷分配示意图

图5中,ASC为防喘振控制器;LSC为负荷分配性能控制器;PIC为主站性能控制器。

主站性能控制器(MPC)在运行过程中,同时指挥所有在线运行并联风机同时、同步、同幅度参与总管压力的控制与调节,极大程度地提升了总管负荷的调节性能。当总管压力突然升高时,主站性能控制器(MPC)发出压力超驰响应以指挥各个在线运行并联机组的防喘振控制器同时、同步、同幅度打开各自的防喘振放空阀门,在保证机组运行安全的同时,实现总管压力控制稳定、精确。反之当总管压力突然下降时,主站性能控制器指挥各个在线运行并联机组的入口导叶同时、同步、同幅度打开,再经过负荷平衡使得总管压力达到设定值。通过这种方式,5台并联运行风机在PS转炉用风量波动大且频繁的工况下,实现所有在线并联运行机组的快速、协同调整从

而实现总管压力的响应快速性和控制稳定性。

4 转炉联动控制系统

通过 Modbus 协议完成 MCP (Master Controller Panel) 中央调度控制系统与合成炉转炉控制系统之间的通讯,将两个系统之间的工艺生产信息进行共享,提高两个单位之间的沟通效率。MCP 中央调度控制系统利用转炉用风风量及炉体位置信息提前调整风机负荷,使得总管压力变化更加平稳。同时,如果转炉控制系统发现风管突然压力下降,则提前联锁转炉,防止发生转炉炉眼倒灌等事故。

5 结语

2023 年 8 月甘肃某公司动力厂鼓风机站转炉供风智能控制系统投入运行,截至 2023 年 12 月机组运行稳定、转炉高效生产,该各项目标控制工艺参数基本达到了预期值。不仅实现了风机运行参数的准确监测和单机的联锁保护,还实现了多台风机的并联定压控制和负荷自动分配。供风总管压力波动范围 106 ~ 124 kPa,与设定值 115 kPa 的偏差为 $\pm 7.8\%$,达到了供风总管压力波动小于 15% 的目标。

参考文献:

- [1] 潘怀民,黄习兵. 多级离心式压缩机防喘振系统模拟研究[J]. 大氮肥,2021,44(05):316-322+337.
- [2] 吴佳欢. 离心式压缩机的防喘振控制设计探讨[J]. 石油化工自动化,2016,52(05):33-36.
- [3] 迟祖涛,刘春弟,康宝杰. 催化裂化机组控制系统的应用及改进[J]. 石油化工自动化,2011,47(04):70-72.
- [4] 付昱,何金起,林锴翔. 基于先进检测的锅炉低负荷安全运行控制系统[J]. 中国安全科学学报,2022,32(S2):94-99.
- [5] 王富强,牛海明,刘千,等. 超临界 CO₂ 燃煤发电机组锅炉出口 CO₂ 温度鲁棒分数阶 PI ^{λ} D ^{μ} 控制[J]. 热能动力工程,2022,37(11):7-14.
- [6] 曹艺,李冬云,刘新平. 油轮锅炉蒸汽压力控制系统的建模及优化研究[J]. 机械设计与制造,2023(06):184-187+192.
- [7] 叶青,王朝阳,易广宙,等. 超超临界二次再热尾部三烟道锅炉汽温动态特性及协同优化控制[J]. 动力工程学报,2023,43(02):117-125+184.

(上接第 115 页)